

# MA8020 Tekniska beräkningar

Något om numerisk integrering

Mikael Hindgren



HÖGSKOLAN  
I HALMSTAD

24 november 2025

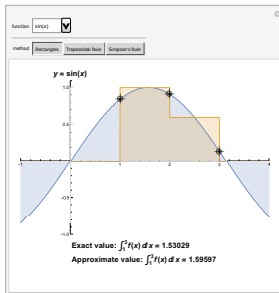
# Numerisk integration

Antag att vi vill beräkna ett approximativt värde på integralen  $\int_a^b f(x) dx$ .

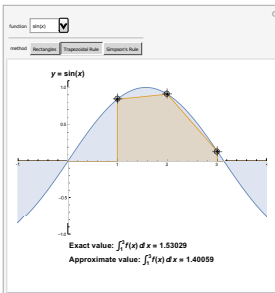
Metod:

- Dela in intervallet  $[a, b]$  i ett antal delintervall
- Approximera  $f(x)$  i varje delintervall med en funktion som är lätt att integrera

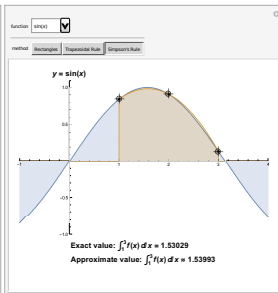
Några alternativ:



Riemannsumma:  
 $f(x) \approx a$  (konstant)



Trapetsformeln:  
 $f(x) \approx ax + b$

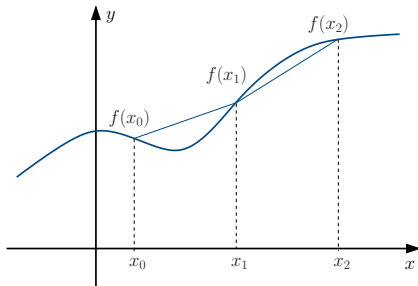


Simpsons formel:  
 $f(x) \approx ax^2 + bx + c$

# Numerisk integration

## Trapetsformeln

- Dela in intervallet i  $n$  lika stora delintervall med längd  $h = \frac{b-a}{n}$ .
- Approximera integralen i varje delintervall med arean under den rätta linjen mellan  $(x_{i-1}, f(x_{i-1}))$  och  $(x_i, f(x_i))$ .
- Varje parallelltrapets har arean  $A_i = \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2} h$ .
- $$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n A_i$$



# Numerisk integration

## Trapetsformeln

### Sats 1 (Trapetsformeln)

Om  $f(x)$  är två gånger kontinuerligt deriverbar på intervallet  $[a, b]$  så är

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) dx &= \frac{h}{2} (f(a) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \cdots + 2f(x_{n-1}) + f(b)) + R_n \\ &= T(h) + R_n\end{aligned}$$

där  $h = \frac{b-a}{n}$  och resttermen

$$R_n = -\frac{(b-a)^3}{12n^2} f''(\xi) = -\frac{b-a}{12} f''(\xi) h^2 = \mathcal{O}(h^2), \quad a \leq \xi \leq b$$

### Exempel 1

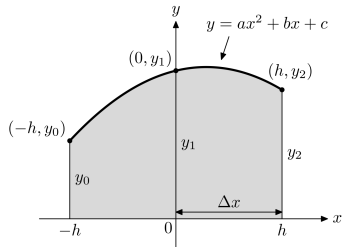
Bestäm ett approximativt värde på  $\int_0^2 \sin x^2 dx$  med trapetsformeln samt uppskatta felets storlek.

# Numerisk integration

## Simpsons formel

Antag att  $f(x) \approx p(x) = ax^2 + bx + c$  i  $[-h, h]$ :

$$\begin{aligned} \int_{-h}^h \underbrace{(ax^2 + bx + c)}_{p(x)} dx &= \left[ \frac{ax^3}{3} + \frac{bx^2}{2} + cx \right]_{-h}^h \\ &= 2 \left( \frac{ah^3}{3} + ch \right) \end{aligned}$$



Om  $p(x)$  går genom punkterna  $(-h, y_0)$ ,  $(0, y_1)$  och  $(h, y_2)$  kan vi enkelt bestämma  $a$  och  $c$ :

$$\begin{cases} p(-h) = a(-h)^2 + b(-h) + c = y_0 \\ p(0) = c = y_1 \\ p(h) = ah^2 + bh + c = y_2 \end{cases} \Rightarrow a = \frac{1}{2h^2}(y_2 + y_0 - 2y_1)$$

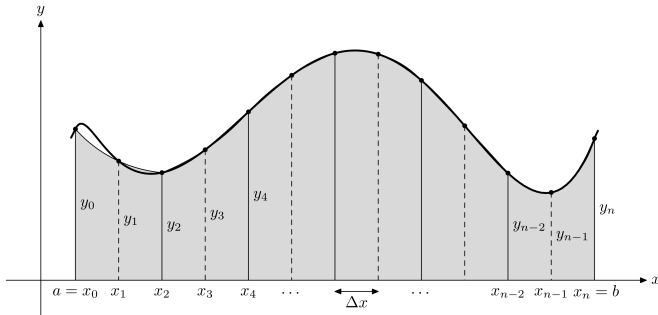
$$\begin{aligned} \Rightarrow \int_{-h}^h p(x) dx &= 2 \left( \frac{\frac{1}{2h^2}(y_2 + y_0 - 2y_1)h^3}{3} + y_1 h \right) = \frac{(y_2 + y_0 - 2y_1)h}{3} + 2hy_1 \\ &= \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2) \end{aligned}$$

# Numerisk integration

## Simpsons formel

Vi kan utnyttja resultatet för att beräkna ett approximativt värde på integralen

$$\int_a^b f(x) dx$$



Vi delar upp intervallet i ett **jämmt antal** ( $n$ ) delintervall med samma längd  $h$ :

$$x_0 = a, \quad x_1 = a + h, \quad x_2 = a + 2h, \quad \dots \quad x_n = a + nh, \quad h = \frac{b - a}{n}$$

# Numerisk integration

## Simpsons formel

Vi kan nu approximera  $f(x)$  med ett andragradspolynom  $p(x)$  i varje delintervall  $[x_i, x_{i+2}]$  och utnyttja vårt tidigare resultat:

$$\int_{-h}^h p(x) dx = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2)$$

$$\Rightarrow \int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2) + \frac{h}{3}(y_2 + 4y_3 + y_4) + \cdots + \frac{h}{3}(y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n)$$

### Sats 2 (Simpsons formel)

Om  $f(x)$  är fyra gånger kontinuerligt deriverbar på intervallet  $[a, b]$  så är

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \frac{h}{3}(f(a) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \cdots \\ &\quad + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(b)) + R_n = S(h) + R_n \end{aligned}$$

där  $h = \frac{b-a}{n}$  och resttermen

$$R_n = -\frac{(b-a)^5}{180n^4} f^{(4)}(\xi) = -\frac{(b-a)}{180} f^{(4)}(\xi) h^4 = \mathcal{O}(h^4), \quad a \leq \xi \leq b$$

**Anm:**  $S(h) = \int_a^b f(x) dx$  för alla polynom  $f$  av grad  $\leq 3$  eftersom  $f^{(4)}(x) = 0 \forall x$ .

# Numerisk integration

## *Simpsons formel*

### Exempel 2

Beräkna ett approximativt värde på integralen  $\int_0^{\pi} \sin x \, dx$  med Simpsons formel för  $n = 4$  och uppskatta felet i approximationen.

### Lösning:

$$\begin{aligned}
 \int_0^{\pi} \sin x \, dx &\approx \frac{b-a}{3n} (f(a) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + f(b)) \\
 &= \frac{\pi}{12} \left( \sin 0 + 4 \sin \frac{\pi}{4} + 2 \sin \frac{\pi}{2} + 4 \sin \frac{3\pi}{4} + \sin \pi \right) \\
 &= 2.00455975...
 \end{aligned}$$

$$|R_4| = \left| \frac{(b-a)^5}{180 \cdot n^4} f^{(4)}(\xi) \right| = \left| \frac{\pi^5}{180 \cdot 4^4} \sin(\xi) \right| \leq \frac{\pi^5}{180 \cdot 4^4} = 0.0066410... \leq 0.01$$

$$\therefore \int_0^{\pi} \sin x \, dx = 2.00 \pm 0.01 \quad (\text{Anm: Integralens exakta värde är 2.})$$

# Numerisk integration

## *Simpsons formel*

### Anm:

- Trapetsformeln: Exakt integration av styckvis linjär interpolation
- Simpsons formel: Exakt integration av styckvis kvadratisk interpolation
- Formlerna ovan är praktiska vid “handberäkningar”. I verkliga fall används oftast adaptiva metoder dvs inte ekvidistant indelning av intervallet.

### Exempel 3

Bestäm ett approximativt värde på  $\int_0^2 \sin x^2 dx$  med Simpsons formel samt uppskatta felets storlek.

# Numerisk integration

## Rombergs metod: Richardsonextrapolation på trapetsformeln

- Man kan visa att

$$\int_a^b f(x)dx = T(h) + a_2h^2 + a_3h^4 + \dots a_kh^{2k} + \mathcal{O}(h^{2k+2})$$

där koefficienterna  $a_2, a_3, \dots, a_k$  är oberoende av  $h$ .

- Kombination av  $T(h)$  och  $T(2h)$  ger:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{1}{3}(4T(h) - T(2h)) + \mathcal{O}(h^4) = T_4(h) + \mathcal{O}(h^4)$$

- Samma sak för  $T_4(h)$  ger:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{1}{15}(16T_4(h) - T_4(2h)) + \mathcal{O}(h^6) = T_6(h) + \mathcal{O}(h^6) \quad \text{osv.}$$

Allmän formel:

$$T_{2n+2}(h) = \frac{1}{4^n - 1}(4^n T_{2n}(h) - T_{2n}(2h)) + \mathcal{O}(h^{2n+2}), \quad n \geq 1.$$

**Anm:**  $T_4(h) = S(h)$  (Simpsons formel).

# Numerisk integration

## Exempel på adaptiv metod: Intervallhalvering med trapetsformeln

Beräkning av  $\int_a^b f(x)dx$  med ett fel  $< \varepsilon$ :

- Låt  $h = \frac{b-a}{2}$  och  $c = \frac{b+a}{2}$ . Beräkna  $T(2h)$  och  $T(h)$ :

$$T(2h) = h(f(a) + f(b)), \quad T(h) = \frac{h}{2}(f(a) + 2f(c) + f(b))$$

- Felet:

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x)dx &= T(h) + a_2 h^2 + \mathcal{O}(h^4) = T(2h) + a_2 (2h)^2 + \mathcal{O}(h^4) \\ T(h) - T(2h) &= 3a_2 h^2 + \mathcal{O}(h^4) \\ \varepsilon_h &= \int_a^b f(x)dx - T(h) = a_2 h^2 + \mathcal{O}(h^4) \approx \frac{T(h) - T(2h)}{3} \end{aligned}$$

- Om  $|\varepsilon_h| < \varepsilon$  är vi klara och  $\int_a^b f(x)dx \approx T(h)$ .
- Annars: Börja om med  $\int_a^c f(x)dx$  och  $\int_c^b f(x)dx$  med kravet att felet  $< \varepsilon/2$  för båda integralerna.

# Numerisk integration

## Gaussisk kvadratur<sup>1</sup>

$$\int_{-1}^1 g(\xi) d\xi \approx \sum_{i=1}^n \omega_i g(\xi_i)$$

- Vikterna  $\omega_i$  och punkterna  $\xi_i$  väljs så att summan ger exakt integral för alla polynom av grad  $p = 2n - 1$ :

$$\xi_i = \text{rötterna till } P_n(\xi) = 0, \quad \omega_i = \frac{2}{(P'_n(\xi_i))^2(1 - \xi_i^2)}$$

- **Optimal ordning:** Minsta möjliga  $n$  som ger integral av polynom exakt värde.
- **Legendrepolynomet**  $P_n(\xi)$  av grad  $n$  kan beräknas rekursivt:

$$\begin{cases} (n+1)P_{n+1}(\xi) = (2n+1)\xi P_n(\xi) - nP_{n-1}(\xi) \\ P_0(\xi) = 1, P_1(\xi) = \xi \end{cases}$$

- Egenskaper:  $P_n(1) = 1$  och Legendrepolynomen är parvis ortogonala:

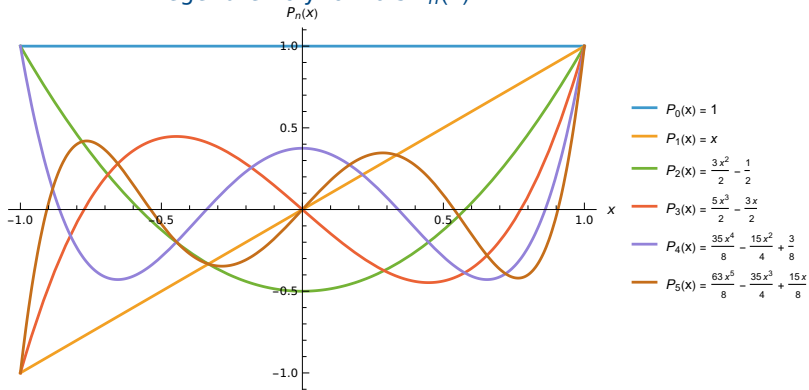
$$\int_{-1}^1 P_m(\xi) P_n(\xi) d\xi = 0 \quad \text{om} \quad m \neq n$$

<sup>1</sup>Carl Friedrich Gauss (1777-1855) & Carl Gustav Jacobi (1804-1851)

# Numerisk integration

## Gaussisk kvadratur

### Legendre Polynomials $P_n(x)$



- För hög noggrannhet krävs att  $f(x)$  approximeras väl av ett polynom av grad  $p \leq 2n - 1$  i integrationsintervallet.
- Felanalysen är mer komplicerad än för Trapetsformeln och Simpsons formel.

# Numerisk integration

## Gaussisk kvadratur

### • I Mathematica:

```
In[*]:= LegendreP[3, x]
```

```
xi = NSolve[LegendreP[3, x] == 0, x]
```

```
wi = 2 / (D[LegendreP[3, x], x]^2 * (1 - x^2)) /. xi
```

```
Out[*]=  $\frac{1}{2} \left( -3x + 5x^3 \right)$ 
```

```
Out[*]= {{x -> -0.774597}, {x -> 0.}, {x -> 0.774597}}
```

```
Out[*]= {0.555556, 0.888889, 0.555556}
```

$n$	$p$	$i$	$\xi_i$	$\omega_i$
1	1	1	0	2
2	3	1	-0.57735027	1
		2	+0.57735027	1
3	5	1	-0.77459667	0.55555556
		2	0	0.88888889
		3	+0.77459667	0.55555556

# Numerisk integration

## Gaussisk kvadratur

### Exempel 4

Beräkna  $\int_0^2 (x^5 - x) dx$  med optimal Gaussisk kvadratur.

#### Lösning:

- Integranden är ett polynom med grad 5:  
Optimal ordning  $2n - 1 = 5 \Leftrightarrow n = 3$ .
- Variabelsubst.  $\int_a^b f(x) dx \rightarrow \int_{-1}^1 g(\xi) d\xi : x = \frac{a+b}{2} + \xi \frac{b-a}{2} \Rightarrow dx = \frac{b-a}{2} d\xi$

$$\begin{aligned}
 \int_a^b f(x) dx &= \int_{-1}^1 \underbrace{f\left(\frac{a+b}{2} + \xi \frac{b-a}{2}\right) \frac{b-a}{2}}_{g(\xi)} d\xi \\
 &= \int_{-1}^1 f\left(\frac{0+2}{2} + \xi \frac{2-0}{2}\right) \frac{2-0}{2} d\xi = \int_{-1}^1 ((1+\xi)^5 - (1+\xi)) d\xi \\
 &= \sum_{i=1}^3 \omega_i g(\xi_i) = \omega_1 g(\xi_1) + \omega_2 g(\xi_2) + \omega_3 g(\xi_3) = 8.666...
 \end{aligned}$$